8　電子の比電荷の測定

加速された電子が磁界中で等速円運動をすることを用いて，電子の質量ｍと電荷－ｅの比，すなわち，比電荷　ｅ/ｍを測定する。

【使用実験機器】電子の比電荷測定器

§１ はじめに

1836年，イギリスの科学者ファラデーは，真空放電を詳しく観察し，気体放電研究の先鞭をつけた。1853年には，マソン（フランス）がトリチェリーの真空の管内で放電実験をしたり，1855年には，プリュッカー（ドイツ）がガラス技術者ガイスラー（ドイツ）に様々な放電真空管を作らせ研究している。

19世紀後半になると，真空放電により電極から飛び出すものが「負の電荷を帯びた粒子」であると考えられるようになり，「陰極線」と名付けられた。

1878年，クルックス（イギリス）は，より真空度の高い放電管を作り，陰極線により羽根車が回転することや，磁界によって陰極線が曲げられることを見出している。なお，現在でも放電真空管を「クルックス管」と呼んでいる。また「電子(electron)」という名称が使われ始めたのもこのころである。

そして，1897年，Ｊ.Ｊ.トムソン（イギリス）により，陰極線が電界で偏向することが確かめられるとともに，質量と電荷の比ｅ/ｍ(比電荷)が初めて実測された。今から約100年前の出来事である。なお，トムソンはこの業績により，ノーベル賞を受賞している。

その後 1909年には，ミリカン（アメリカ）が電気素量ｅの測定に成功したため，電子の質量ｍも計算でき，電子の実体が解明されることになった。現在わかっている精密な数値は，

$e/m = 1.75881962\times10^{11}$ [C/kg]

$e = 1.60217733\times10^{-19}$ [C]

$m = 9.1093897\times10^{-31}$ [kg]

である[3]。

§２ 実験の原理

1　説明

①　電界中の電子の運動

(a)電圧Ｖ[Ｖ]による加速

図１のように，初速度　０の電子が，電界から電気力を受け，ｅＶ[Ｊ]の仕事をされて加速するので，

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \qquad \cdots (1)$$

が成り立つ。

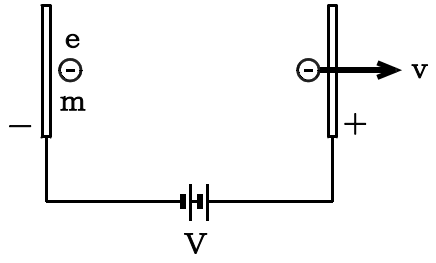

図１　電圧Ｖによる電子の加速

(b)電界による偏向

図２のように，速度v[m/s]の電子が電界Ｅ[Ｎ/Ｃ]に垂直に入射すると，電界と逆向きに電気力を受け，偏向する。極板の長さをＬ[m]とすると，電気力の大きさがｅＥ[Ｎ]なので，偏向する距離ｙ[m]は，

$$y=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\left(\frac{eE}{m}\right)\left(\frac{L}{v}\right)^2 \quad \cdots (2)$$

となる。

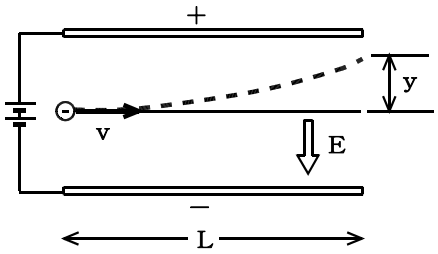

図２　電界による電子の偏向

② 磁界中の電子の運動

図３のように，速度v[m/s]の電子が，磁束密度Ｂ[Wb/m^2]の磁界に垂直に入射すると，電荷は垂直な向きにローレンツ力を受け，等速円運動を行う。電子の運動方程式は，ローレンツ力の大きさが　ｅvＢ[Ｎ]なので，

$$evB=m\frac{v^2}{r} \quad \cdots (3)$$

となる。

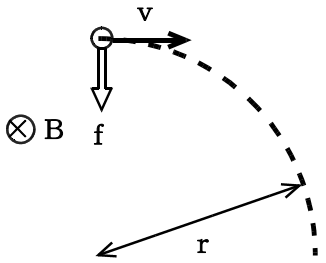

図３　磁界中で等速円運動する電子

③ 電界・磁界中で直進する電子

図４のように電界から受ける電気力ｆ$_E$と，磁界から受けるローレンツ力ｆ$_B$がつり合いの関係になると，電子は直進する。このとき，

$$eE=evB \quad \cdots (4)$$

が成り立つ。

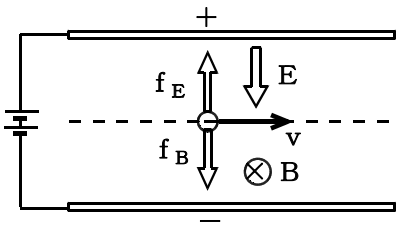

図４　電界・磁界中で直進する電子

④ 以上１～３の運動の内，ふたつを組み合わせると関係式より比電荷ｅ/ｍを求めることができる。例えば，(1)(3)式より，vを消去すれば，

$$e/m=\frac{2V}{B^2r^2} \quad \cdots (5)$$

となる。この方法で比電荷を測定する装置が，今回使用する実験装置である。なお，トムソンは，主に(2)式と(3)式を用いて実測を行っている。

2　電子の比電荷測定器

(1)測定器の構成

図５に測定器の構成を示す。

(2)管球

加速電圧が約 100～350Ｖの範囲で変えられる電子銃を持っている。また，管球内にヘリウムガスが低圧状態で封入してあるため，電子線は蛍光を発し，その軌跡を肉眼で観察することができる。電子銃の原理は，図７のように，ヒーターＨの加熱によりカソードＫ

1. 管球
2. ヘルムホルツコイル
3. 管球保持具
4. 暗箱
5. コイル電源端子
6. コイル電流測定端子
7. 加速電圧測定端子
8. 加速電圧可変つまみ
9. ヒューズ
10. 電源スイッチ
11 電源コード
12. 電子ビーム直径測定指標
13. 目盛板
14. フード
15. 天板

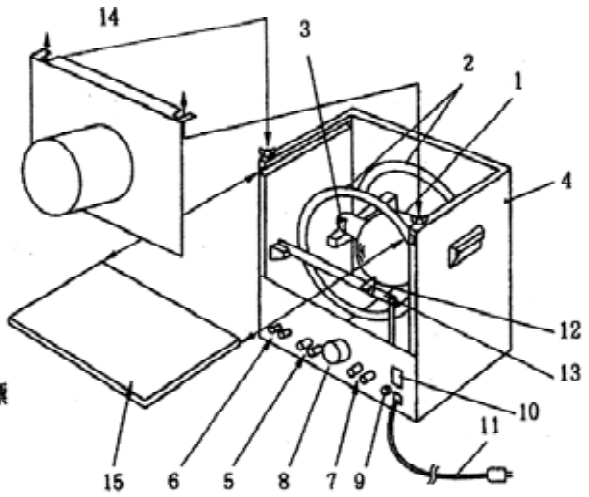

図５　測定器の構成

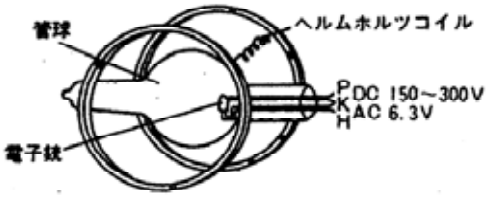

図６　管球とヘルムホルツコイル

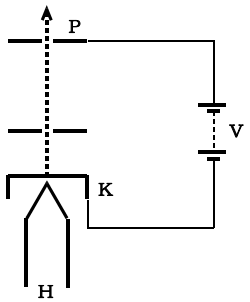

図７電子銃

から飛び出した電子(初速度　０)が，プレートＰとの電圧Ｖで加速されて飛び出すものである。

【使用上の注意】管球の寿命を延ばすため，測定時以外は加速電圧を最小にすること。

(3)ヘルムホルツコイル

半径Ｒ[m]の同型のコイルが半径と同じ距離Ｒだけ離して置かれている。コイルの中心付近には一様な磁界ができ，磁束密度Ｂ[Wb/m^2]は次式で与えられる。

$$B=\left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}}\frac{\mu_0 n I}{R}$$

ただし，μ_0：真空の透磁率で　$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ [N/A^2]

ｎ：コイルの巻き数　使用器では　ｎ＝130

Ｒ：コイルの半径　　使用器では　Ｒ＝0.15[m]

Ｉ：コイルの電流　　使用器では　０～２[Ａ]の範囲で使用可能

以上の数値を用いると，使用器では，Ｂの大きさは電流Ｉのみで決まり，

$$B=7.79\times10^{-4}\cdot I \qquad \cdots\ (6)$$

となる。

【使用上の注意】コイルに２[Ａ]以上の過大電流を流すと，コイルを焼く恐れがあるので注意すること。

§３ 実験

1 実験装置および器具

電子の比電荷測定器 ＥＭ－３０Ｎ
直流安定化電源装置 RDS (出力可変でＤＣ12Ｖ 2A以上のもの)
直流電流計 HQ-5　　5A端子使用
直流電圧計 HQ-300　300Ｖ端子使用

2 実験の方法

① 図８のように接続する。端子の正負を間違えないこと。

直流電流計は５[Ａ]端子を，直流電圧計は 300[Ｖ]端子を使用する。

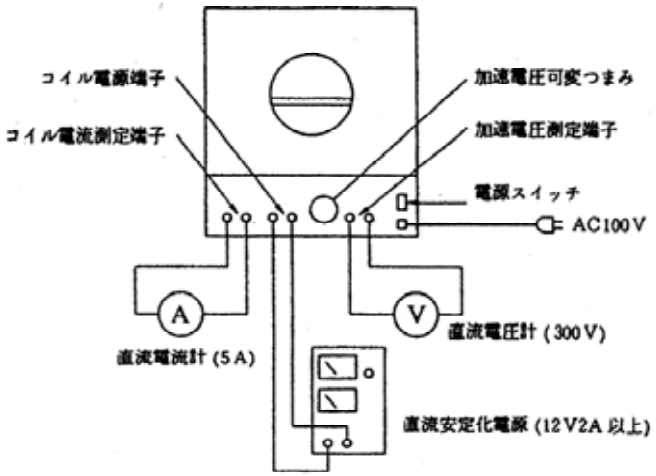

図８　装置の配線図

② 加速電圧可変つまみと直流安定化電源出力つまみを最小(左端)にして，電源スイッチを入れる。

③ 加速電圧Ｖを一定にして，磁界の強さ(すなわちコイルを流れる電流Ｉ)を増加させると，円軌道の直径が小さくなることを確認する。次に，磁界の強さ(すなわちコイルを流れる電流Ｉ)を一定にして，加速電圧Ｖを増加させると，円軌道の半径が大きくなることを確認する。

【注意】加速電圧Ｖを300[Ｖ]以上にして，電圧計を壊さないように注意する。

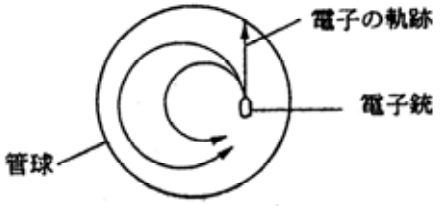

図９　電子の円軌道の半径の変化

④ はじめに，図10のように，指標を見通して電子銃から電子が発射されている位置に目盛り板の０に合わせる。次に，加速電圧Ｖ，コイルを流れる電流Ｉを適当に変え，円軌道の直径 2ｒを，指標を移動させて測定する。このとき，Ｖ，Ｉ，ｒの取り方は任意であるが，装置の精度から考えて最も読み取りの誤差が大きいのが 2ｒの測定なので 2ｒ＝10[㎝] 程度に固定して測定をする方法がよい。

また，ｒの読み取りの精度を上げるために，指標の位置に筒上のもの(ストローなど)を付けるとよい。

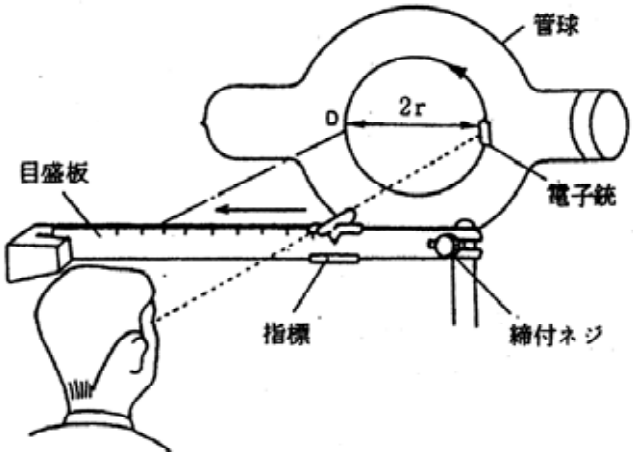

図10　電子の軌跡の直径の測定

⑤　上記の理由により，2ｒ＝ 0.10[m]に固定する。加速電圧Ｖを変え，それぞれの場合で電流値Ｉを調節し 2ｒ＝ 0.10[m]となるときの電流値を読みとる。測定値より比電荷の値を計算し，本来の値と比較する。

§４ 実験結果と分析

比電荷 ｅ/m は，(5)(6)式より，使用器では次のようになる。

$$e/m = 3.293\times10^{6}\cdot\frac{V}{I^{2}r^{2}} \qquad \cdots (7)$$

ｒ＝0.05[m] であるから，

$$e/m = 3.293\times10^{6}\cdot\frac{V}{I^{2}\times(5.00\times10^{-2})^{2}}$$

$$= \frac{3.293}{25}\times10^{10}\cdot\frac{V}{I^{2}}$$

$$= 1.317\times10^{9}\cdot\frac{V}{I^{2}} \qquad \cdots (8)$$

と表せる。有効数字を考えると，３桁まで求めるのが妥当である。

測定結果の一例を表１に示す。

表１　測定結果（例）

No	加速電圧Ｖ[Ｖ]	コイルの電流Ｉ[Ａ]	軌道半径ｒ[m]	比電荷の値[Ｃ/kg]
1	100	0.82	5.0×10^{-2}	1.96×10^{11}
2	150	1.01	5.0×10^{-2}	1.94×10^{11}
3	200	1.15	5.0×10^{-2}	1.99×10^{11}
4	250	1.31	5.0×10^{-2}	1.92×10^{11}
5	300	1.43	5.0×10^{-2}	1.93×10^{11}

・ｅ/m 平均値　1.95×10^{11}[Ｃ/kg]
（本来の値 は，1.75881962×10^{11}[Ｃ/kg]）
・ｅ/mの平均値の相対誤差は，

$$\text{相対誤差} = \frac{(\text{平均値}) - 1.76\times10^{11}}{1.76\times10^{11}}\times100 = 10.8[\%]$$

測定例では，本来の値に比べて 10%程度高い測定値となっている。この理由は，もともと管球の特性上 ±10%程度の誤差がある(取扱説明書による)ことや，指標による軌道半径の読み取りの誤差が大きいためであると考えられる。

【参考文献】

[1]「電子の比電荷測定器」取扱説明書（島津理化器械(株)）
[2] 高等学校「物理ＩＢ」「物理Ⅱ」（第一学習社）
[3] 理科年表(1995年版)